

**dr hab. inż. Tomasz CZAKIERT, prof. PCz**  
ul. Wysockiego 17 B, 42-218 Częstochowa  
tel. kom. 608 089 178

**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**  
Wydział Infrastruktury i Środowiska  
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych  
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa  
tel. 34 3250 945, e-mail: tczakiert@is.pcz.czyst.pl

Częstochowa, 31.07.2020 r.

**Szanowny Pan**  
**Prof. dr hab. inż. Stanisław PRUSEK**  
Dyrektor  
Główny Instytut Górnictwa  
Plac Gwarków 1  
40-166 Katowice

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja WEISSA**

#### **1. Wprowadzenie**

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Nr NSR/119/2020 z dnia 22 czerwca 2020 roku.

#### **2. Zakres rozprawy**

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Weissa nosi tytuł „Analiza śladu węglowego produkcji energii elektrycznej z węgla kamiennego z uwzględnieniem technologii usuwania CO<sub>2</sub>”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Marcin Lutyński, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym dr inż. Aleksandra Koterias.

Praca liczy ogółem 124 strony, włączając spis literatury w ilości 162 pozycji (w tym kilkadziesiąt odnośników do źródeł Internetowych), spisy tabel i rysunków oraz 9 załączników stanowiących integralną część rozprawy. Zebrany materiał rozdzielono pomiędzy 8 głównych rozdziałów (łącznie z Rozdz. I. Cel, teza i zakres pracy), poprzedzonych wprowadzeniem, a zakończonych zwięzłym podsumowaniem.

We wstępie Doktorant wskazuje na pobudki jakimi kierował się przy wyborze podjętej tematyki badawczej. Problem nisko- lub wręcz zero-emisyjnej produkcji energii elektrycznej opartej na wydobywanych kopalinach energetycznych jest cały czas aktualny; co więcej, wydawać się może, że dla krajów takich jak Polska z roku na rok będzie przybierał coraz to większego znaczenia. Tym bardziej szkoda, że Autor nie odnosi się do bardziej aktualnych strategii w zakresie polityki klimatyczno-energetycznej, zakładających cele do roku 2030 czy 2050, przywołując ustalenia sprzed kilkunastu lat, takie jak pakiet „3x20” czy „Europa 2020”.

Teza pracy (rozdział I) nawiązuje wprost do tytułu dysertacji. Cel naukowy pracy koresponduje ze sformułowaną tezą, a zakres zaplanowanych analiz wydaje się być wystarczający dla jego osiągnięcia. Z kolei, postawione pytania problemowe sprawiają wrażenie zbyt oczywistych, a pewne odpowiedzi padają się już we wstępie do czytanej rozprawy. Jednocześnie uwagę zwracają przewidziane do przeprowadzenia badania ankietowe o ogólnopolskim zasięgu, co istotnie wykracza poza spodziewane ramy przedmiotowej rozprawy.

W rozdziale II.1 Autor przybliży czytelnikowi pojęcie śladu węglowego (CF), prezentuje różne podejścia w określaniu wartości CF, podaje konkretne przykłady wdrożenia polityki śladu węglowego w wielkich korporacjach wraz z wymiernymi korzyściami jakie te działania przynoszą. Zawartość rozdziału pokazuje jednocześnie dobre rozeznanie Doktoranta w literaturze przedmiotu. Uwagę zwraca przy tym dojrzały a zarazem fachowy język, co zdecydowanie ułatwia czytanie pracy.

W rozdziale II.2 Doktorant koncentruje swoje rozważania na produkcji energii elektrycznej, porównując wielkości śladu węglowego dla różnych źródeł, tj. elektrowni bazujących na paliwach kopalnych, odnawialnych źródłach energii oraz elektrowni jądrowej. Nawiązując do tematu rozprawy omawia również pokrótce najlepiej rozpoznane metody wychwytu i deponowania oraz zagospodarowania przejętego dwutlenku węgla.

Rozdział III to wielowariantowa analiza prowadząca do oszacowania wielkości śladu węglowego towarzyszącego produkcji energii elektrycznej w klasycznej pyłowej elektrowni zasilanej węglem kamiennym (podrozdział III.3) oraz w zakładzie zgazowania węgla ukierunkowanym na produkcję gazu SNG bądź alternatywnie wytwarzającym energię elektryczną (rozdział III.4). Autor analizuje jednocześnie efekt jaki niesie ze sobą zastosowanie wychwytu emitowanego dwutlenku węgla z przeznaczeniem do jego geologicznej sekwestracji (CCS) lub wtórnego wykorzystania (CCU). Swoim rozważaniom stawia dość rozległe ramy, obejmujące wydobywanie surowca energetycznego, produkcję pozostałych materiałów powiązanych z procesem wytwarzania energii elektrycznej oraz ich transport w dwóch scenariuszach (drogowym i kolejowym), co z pewnością wyróżnia tą pracę na tle innych opracowań o podobnej tematyce. Podjęty temat jedynie z pozoru może wydawać się prosty. Lektura głównego rozdziału dysertacji (szczególnie podrozdziałów III.3 i III.4) wskazuje bowiem na rozległą wiedzę jaką należało wykazać się przy jego realizacji oraz na spore zaangażowanie wynikające z konieczności pozyskania dużej ilości różnorodnych danych niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń. Doktorant schodzi przy tym do szczegółu,

uwzględniając między innymi takie elementy jak 1% utratę czynnika roboczego w instalacji wychwytu CO<sub>2</sub>, zwałowanie węgla na składowiskach czy spalanie paliwa przez pojazdy obsługi technicznej, co niewątpliwie zasługuje na duże uznanie.

Do oszacowania niepewności uzyskanych wyników (podrozdział III.5) Autor wykorzystuje dedykowane dla tego rodzaju danych narzędzie udostępnione przez Greenhouse Gas Protocol, co ostatecznie pozwoliło na stwierdzenie o zadawalającej dokładności otrzymanych wyników.

Podrozdział III.6 zawiera analizę, a w zasadzie jedynie pobieżne omówienie najważniejszych wyników znanych już z podrozdziału III.4, tu zestawionych na 6 zbiorczych wykresach. Doktorat konfrontuje ze sobą wartości świadczące o wielkości produkcji i sprzedaży energii elektrycznej oraz wielkości potrzeb własnych towarzyszących procesowi wytwórczemu. Wskazuje przy tym na wielkość powstającego śladu węglowego, szacując udział poszczególnych procesów jednostkowych występujących na kolejnych etapach produkcji energii elektrycznej.

W ostatnim podrozdziale III.7 Doktorant prezentuje wyniki sondażu przeprowadzonego na prawie pół tysięcznej grupie przypadkowych respondentów, będące obrazem świadomości i akceptowalności społecznej dla technologii geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>, umożliwiającej radykalne ograniczenie emisji tego gazu do atmosfery. Wydaje się, że większość przedstawionych wyników pozostaje w zgodzie z tym co może podpowiadać intuicja, niektóre odpowiedzi okazują się jednak nieco zaskakujące, wskazują na brak wiedzy bądź wręcz ignorowanie problemu przez nasze społeczeństwo.

Rozprawa doktorska kończy się rozdziałem IV zawierającym wnioski powiązane z postawioną na początku pracy tezą oraz celem i zakresem przeprowadzonych analiz.

### **3. Ocena rozprawy**

Przedmiotem ocenianej rozprawy doktorskiej jest zagadnienie związane z holistycznym ujęciem procesu wytwarzania energii elektrycznej zintegrowanego z wychwytem CO<sub>2</sub> i jego późniejszym składowaniem bądź zagospodarowaniem, rozważane w kontekście towarzyszącego mu tzw. śladu węglowego. Podjęta przez Doktoranta tematyka dotyka zatem niezwykle istotnej a zarazem aktualnej kwestii dotyczącej produkcji energii elektrycznej opartej na rodzimym źródle energetycznym – węgla z wykorzystaniem technologii charakteryzujących się zminimalizowanym oddziaływaniem na środowisko naturalne. Stanowi to tym samym o trafności wyboru obszaru zainteresowań naukowych Doktoranta.

Przedłożona praca nie jest wolna od niedociągnięć i niedoskonałości, niemniej jednak zebrany materiał jest na tyle bogaty, że z pewnością zasługuje na uwagę. Na etapie jej lektury nasuwały się miejscami różnego rodzaju pytania, uwagi i komentarze, które w kolejności chronologicznej zostały spisane poniżej.

1. *Wstęp*: Przytoczone wartości: 83,5, 49,4, 21,6, 12,2, 2,9 i 0,4 TWh nie dają podanej sumy 175,8 TWh.
2. *Rozdział I (Struktura pracy)*: W moim przekonaniu, studia literaturowe (rozdział 2 niniejszej pracy), stanowiące punkt wyjścia do zdefiniowania tezy i celu jak również określenia zakresu pracy winny poprzedzać w tym przypadku rozdział 1 (Cel, teza i zakres pracy).
3. *Rozdział II.1 (Rysunek 2)*: Opisy na rysunku powinny zostać przetłumaczone na język polski.
4. *Rozdział II.2*: Interesujące może okazać się podejście do określenia wielkości śladu węglowego w przypadku obiektów spalających biomasę. Czy metodologia obliczeń uwzględnia naturalny wychwyt CO<sub>2</sub> przez rośliny zielone w procesie fotosyntezy i ich możliwą wtórną utylizację (np. w przypadku istnienia towarzyszącej plantacji roślin energetycznych)? Proszę Doktoranta o uzupełniającą informację w tym zakresie.
5. *Rozdział III (oraz powiązane załączniki)*: Zastosowany przez Doktoranta zapis wartości liczbowych: np. 11 000 ton to „1,10e + 04 Mg” w znaczący sposób utrudnia percepcję pracy.
6. *Podrozdział 3.1*: Kolejne obliczenia, słusznie zamieszczone w załącznikach, są niepotrzebnie powielane w tekście pracy, np. równania 3.1 (8.2), 3.2 (8.3), ..., 3.5 (8.6).  
str. 24: Zgodnie z dalszymi obliczeniami produkcja ciepła wynosi 521 794 GJ (a nie 531 794 GJ) – błąd edycyjny.  
str. 28: Gęstość oleju napędowego to 0,85 kg/l (a nie 0,85 l/kg) – ten błąd edycyjny powielany jest w całej pracy łącznie z załącznikami.  
str. 32 (Tab. 1): Wpisano błędną wartość gęstości oleju napędowego (= 0,82 kg/l) oraz błędną wartość energetyczną dla ciężkiego oleju opałowego (0,28 TJ) – błędy edycyjne.  
str. 32 (oraz załącznik 1, równanie 8.23): Wartość śladu węglowego wyprodukowania oleju napędowego wykorzystywanego podczas transportu drogowego wyliczono z błędem: jest 30,113 tCO<sub>2</sub>eq, powinno być 29,607 tCO<sub>2</sub>eq. Tym samym, wartość całkowitego śladu węglowego wyniesie w tym przypadku 216,212 tCO<sub>2</sub>eq (a nie 216,718 tCO<sub>2</sub>eq).  
str. 33 (oraz załącznik 1): Czy w przypadku określania wielkości śladu węglowego transportu kolejowego materiałów nie należało uwzględnić masy własnej wagonów? W przeciwnym razie czemu służą założenia mówiące o maksymalnej ładowności jednego wagonu? Proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.
7. *Podrozdział 3.2*: Czy wartości zastosowanych przeliczników zużycia energii elektrycznej (0,2 MWh/MgCO<sub>2</sub>) i ciepła (3,6 GJ/MgCO<sub>2</sub>) odnoszą się do ilości CO<sub>2</sub> doprowadzanego do układu separacji czy ilości wychwyconego dwutlenku węgla. Proszę Doktoranta o uzupełniającą informację w tym zakresie.

Wartości liczbowe podane w podrozdziale 3.2.2 (str. 39) oraz podrozdziale 3.2.4 (str. 40) podobnie jak wcześniej w początkowych akapitach podrozdziału 3.2.1. (str. 37) wydają się odnosić do różnych ilości wychwytywanego CO<sub>2</sub> – m.in. do wartości ~3 498 036 MgCO<sub>2</sub> co byłoby równoznaczne z wychwytem 90% emitowanego CO<sub>2</sub> (a nie 92%, jak przyjęto w założeniach).

8. *Podrozdział 3.3*: Warunki odniesienia dla przyjętej gęstości wodoru „273k,10113 hPa” to: 273 K, 1013 hPa – błędy edycyjne na str. 42.

str. 43: Należało doprecyzować, czy mowa o stosunku masowym czy objętościowym substratów H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> = 4:1.

9. *Podrozdział 4.1*: Na jakiej podstawie określono wartość emisji 3 593 149,35 MgCO<sub>2</sub>, co dotyczy również obliczeń zamieszczonych w załączniku 4 na str. 117; czy analogicznie jak miało to miejsce w przypadku spalania węgla w klasycznej elektrowni (patrz: str. 111)? Proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.

str. 48: Podano błędne wartości: 176,863 GJ (powinno być 65 176,863 GJ – por. str. 27), 9,837 tCO<sub>2</sub>eq (powinno być 3638,172 tCO<sub>2</sub>eq – por. str. 117) oraz 19,14 tCO<sub>2</sub>eq (powinno być 16,553 tCO<sub>2</sub>eq – por. str. 32).

10. *Podrozdział 4.2 (oraz powiązany załącznik 5)*: W równaniach 8.54 i 8.55 oraz 8.56 i 8.57 zastosowano przeliczniki odpowiednio 1,602 tCO<sub>2</sub>eq/MWh oraz 0,04495 tCO<sub>2</sub>eq/MWh, różne od wyników obliczeń uzyskanych w poprzednich rozdziałach. Proszę Doktoranta o krótkie wyjaśnienie w tym zakresie.

str. 119: Różne zaokrąglenie przelicznika (0,04495 i 0,04496 tCO<sub>2</sub>eq/MWh) w kolejnych równaniach 8.56 i 8.57 prowadzi do rozbieżności w uzyskanych wynikach rzędu 13 tCO<sub>2</sub>eq/MWh.

str. 119 i 120: Wyniki obliczeń (równania 8.58 i 8.59) są zaniżone o około 10 700 tCO<sub>2</sub>eq/MWh.

11. *Podrozdział 4.3*: Bilans energetyczny (energii elektrycznej i ciepła) procesu produkcji gazu SNG w konfiguracji z CCU jest wyjątkowo nieprzejrzysty, stąd ciężko go ostatecznie zweryfikować. Ewidentnie zabrakło tu (podobnie jak i w poprzednich podrozdziałach) graficznego (ewentualnie tabelarycznego) ujęcia tego istotnego zagadnienia.

12. *Podrozdziały 4.4-4.6*: Dane i informacje dostarczone w kolejnych podrozdziałach 4.4-4.6 i powiązanych załącznikach 7-9 pozostają niewystarczające do pełnej weryfikacji przeprowadzonej tu analizy. Przykładowo, dlaczego w procesie zgazowania dyskutowanym w podrozdz. 4.4 ilość „produkowanej” siarki jest 3,5 razy większa od tej powstającej z takiej samej ilości węgla w podrozdz. 4.1. Dlaczego w produktach nie ma azotu, w przypadku gdy mowa jest o tlenowym dopalaniu powstającego karbonizatu (a w podrozdz. 4.1 taki produkt występuje). Skąd różnice w ilościach powstającego dwutlenku węgla przyjętych w założeniach, itd. Wszystkie te niedopowiedzenia, poczynając od

składu zastosowanego paliwa, wymagały moim zdaniem kilku słów uzupełniającego komentarza, którego tu najzwyczajniej zabrakło.

str. 55: W tekście pojawia się już trzecia wartość odnosząca się do śladu dla transportu drogowego: 18,7 tCO<sub>2</sub>eq (wcześniej: 16,553 i 19,14 tCO<sub>2</sub>eq). Poza tym uważam, że kontynuowanie obliczeń dla obu konfiguracji, tj. z transportem drogowym i kolejowym, przy tak minimalnych różnicach ujawnionych we wcześniejszych podrozdziałach, na tym etapie pracy staje się bezcelowe.

str. 57: Podano błędną wartość: 2,029 tCO<sub>2</sub>eq (powinno być 2,436 tCO<sub>2</sub>eq) – błąd edycyjny.

Tekst podrozdziałów 4.4-4.6 został w dużej mierze i w obszernych fragmentach przeniesiony ze wcześniejszych podrozdziałów 4.1-4.3, stąd analogiczne uwagi jak powyżej co do transparentności przeprowadzanego miejscami wyводу.

*Podrozdział 5:* Występują pojedyncze błędy edycyjne w tabelicy 4, np. w pierwszej komórce: 12138953,00 kg (powinno być 1867531900 kg).

*Podrozdział 6:* W dwóch przypadkach (EW CCU i ZWG CCU), Autor nie wyjaśnia rozbieżności pomiędzy wartościami wynikającymi z produkcji (Rys. 17) i zużycia energii elektrycznej (Rys. 18) a wartościami sprzedaży energii elektrycznej (Rys. 19). Rozbieżności te dotyczą również wartości podanych w odpowiednich podrozdziałach, m.in. w podrozdz. 4.3. Proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.

str. 69: Wartości średnie podane w tekście: 4279759, 1050535 i 949399 tCO<sub>2</sub>eq nie korespondują z tymi zamieszczonymi na omawianym rysunku 20. Proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.

str. 72: Autor przeczy sam sobie mówiąc o instalacji z układem CCU, że „... nie ma potrzeby stosowania różnego rodzaju sorbentów, które zwiększają ślad węglowy ...”, a jednocześnie wyliczając jego wielkość np. w załączniku 3 (str. 116).

str. 72: Do których danych przedstawionych na powiązanim rysunku odnosi się opis znajdujący się w ostatnim paragrafie na str. 72: „Z analizowanych instalacji ... usuwania dwutlenku węgla.” Proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.

str. 73: Rysunek 22 mógłby mieć wyższą jakość i lepiej dobrane kolory, co zwiększyłoby jego czytelność.

13. *Podrozdział 7:* Ponieważ nie wszystkie pytania zostały zilustrowane graficznie, opracowany formularz ankiety można było zamieścić na końcu pracy, jako kolejny załącznik.
14. *Rozdział IV:* Główny wniosek odnoszący się wprost do tezy pracy, mówiący o tym, że „... technologie usuwania CO<sub>2</sub> z procesu produkcji energii elektrycznej nie są technologiami bezemisyjnymi” wydaje się nazbyt oczywisty i w obliczu zgromadzonego w pracy materiału powinien być bardziej doprecyzowany. Podobna uwaga dotyczy

trzeciego wniosku. Z kolei, drugi z wniosków choć słuszny w swojej treści, wymaga lepszego uzasadnienia.

15. Załącznik 1, str. 106: Podano wartość  $36,1 \text{ m}^3$  dla transportu materiałów płynnych, kiedy to w tekście na str. 31 mowa jest o  $39 \text{ m}^3$ .

str. 107: Błędy edycyjne w równaniach 8.8 i 8.9: 6587 kg (powinno być 5599), 0,28 TJ (powinno być 0,24), 21,067 tCO<sub>2</sub>eq (powinno być 18,058) oraz w podsumowaniu na str. 109: 189,614 tCO<sub>2</sub>eq (powinno być 186,605) i 219,727 tCO<sub>2</sub>eq.

16. W pracy brakuje streszczenia, w tym w języku angielskim przewidzianego polskim ustawodawstwem.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta w przedstawionej dysertacji naukowej uważam oszacowanie i porównanie wielkości śladu węglowego towarzyszącego produkcji energii elektrycznej w konwencjonalnej pyłowej elektrowni węglowej oraz zakładzie zgazowania węgla, skojarzonej z wychwytem powstającego CO<sub>2</sub> przeznaczonego do dalszej geologicznej sekwestracji bądź wtórnego zagospodarowania.

#### 4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo ważnego problemu naukowego, jakim jest ocena wielkości śladu węglowego towarzyszącego kompleksowo ujętemu procesowi produkcji energii elektrycznej, przy zastosowaniu różnych technologii konwersji energii chemicznej paliwa oraz różnych metod ograniczenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Jednocześnie, Doktorant wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w reprezentowanej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej ocenie przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Biorąc pod uwagę całokształt zrealizowanych prac oraz kluczowe osiągnięcie Doktoranta uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Weissa „Analiza śladu węglowego produkcji energii elektrycznej z węgla kamiennego z uwzględnieniem technologii usuwania CO<sub>2</sub>” mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

**W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony w Głównym Instytucie Górnictwa.**

